

特点描述

- ◆ 可以测定 CFRP 设计所需的层间强度。
- ◆ 通过使用 TRViewX 记录裂纹扩展情况，即使在试验结束后也能观察裂纹长度。

■ 引言

与传统材料相比，碳纤维增强塑料（CFRP）具有较高的比强度和比刚度，而且耐腐蚀性好，当前主要研究将其用于对强度和耐久性具有要求的飞机材料。但是，已知 CFRP 层压材料仅在增强方向（纤维方向）具有出色的力学特性，而非增强方向（层间方向等）的强度明显较低。另外，CFRP 层压材料抗冲击性较差，受到冲击载荷时，材料内部可能产生层间剥离等损伤现象。因此，在设计和产品开发中纳入了损伤容限设计，旨在考虑材料内部的损伤对强度的影响。进行损伤容限设计时，需要确定抗裂纹扩展性，并进行断裂韧性试验。

对于均质各向同性材料，通常只进行模式 I（开口型）的断裂韧性试验，但对于由树脂基质和纤维构成的复合材料，由于其呈各向异性，因此，除模式 I 之外，模式 II（面内剪切型）、模式 III（面外剪切型）等各种模式的评价也很重要（参见图 1）。DCB 试验（Double Cantilever beam Test）是单纯进行模式 I 特性评价的试验。均质各向同性材料的韧性评价通常采用应力强度因子 K，而作为各向异性材料的复合材料的层间断裂一般采用与应力强度因子 K 的平方成正比的应变能释放率 G 进行评价。

本文中通过进行依据 ASTM D5528 的 DCB 试验，获得了模式 I 的层间断裂韧性 G_{Ic} 。

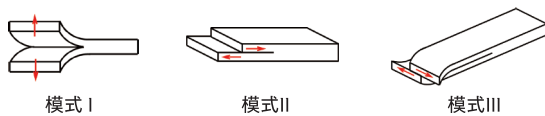


图 1 模式示意图

■ 模式 I 层间断裂韧性 G_{Ic}

图 2 所示为用于确定模式 I 层间断裂韧性 G_{Ic} 分析试验力 P 的方法。(1)NL (2)5%/max (3)VIS 的定义如下

- (1)NL : 非线性行为的开始点
- (2)5%/Max : 5% 偏移点或最大试验力点
- (3)VIS : 目视检查裂纹发生点

模式 I 层间断裂韧性 G_{Ic} 可通过上述 3 种方法获得。

计算 G_{Ic} 的方法有四种：①无校正② MBT ③ CC ④ MCC。ASTM D5528 指出，“MBT、CC、MCC 的校正方法的差异不足 3.1%，没有哪种方法优于其他方法。但是，基于 MBT 的计算方法得到的数值最保守”，建议使用基于 MBT 的校正方法。（ G_{Ic} 的计算方法参见第 4 页的新增部分）

■ 测定系统

图 3 所示为本次试验所用的试样照片。ASTMD5528 规定，试样的两个侧面的裂纹扩展长度为 5 mm 以内时，按每 1 mm 标记刻度，长度为 5 mm ~ 25 mm 时，按每 5 mm 标记刻度，本次在试样一侧标记用于确认裂纹扩展的刻度，另一侧粘贴裂纹计测量裂纹长度。将载荷块粘接在试样上，用于在模式 I 方向施加载荷。此外，通过在试样制备过程中在各层之间放置了一层薄膜，以形成裂纹的起始点。

在这些试验中，对裂纹扩展的程度进行了监测，监测范围从最初裂纹的顶端开始，直至 50 mm 长。在视频非接触式引伸计（以下描述为 TRView）上安装近摄环，以高倍率拍摄刻度，通过摄像头确认裂纹扩展长度。使用 TRViewX 保存视频，试验后，可在观察与结果同步的视频的同时，进行计算处理。

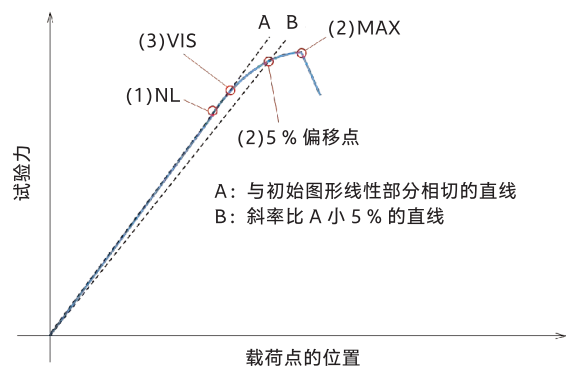
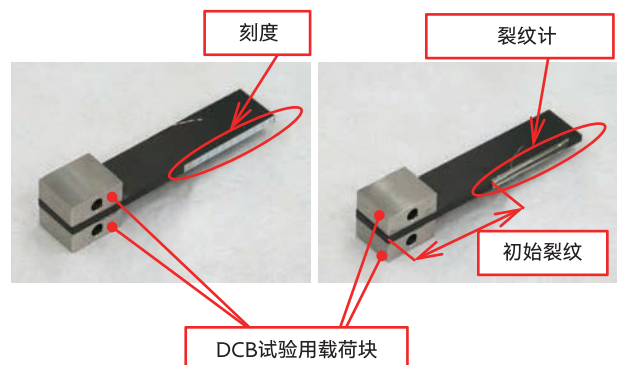

 图 2 用于获得模式 I 层间断裂韧性 G_{Ic} 的试验力位置


图 3 试样照片（左：刻度侧、右：裂纹计侧）

■ 试验

图4所示为试验示意图。在TRViewX的视野内，当设置为高倍率进行精确测量时，无法跟踪试样中裂纹拓展的全部范围。因此，安装了一个滑轨，将相机向裂纹拓展方向移动，并手动调整位置，以便在试验过程中使裂纹尖端保持在视野内。表1所示为仪器配置和试验条件，表2所示为试样信息。

试验时，首先施加使裂纹长度达到3-5 mm的载荷，确认试样两个侧面的裂纹长度。此时，如果两个侧面的裂纹长度之差达到2 mm以上，则暂停试验。本次试验中，比较TRViewX记录的裂纹长度与裂纹计测量的裂纹长度，确认无2 mm以上的差。确认裂纹长度后，再次以恒定速度进行试验，计算各裂纹长度下的模式I层间断裂韧性 G_{Ic} 。

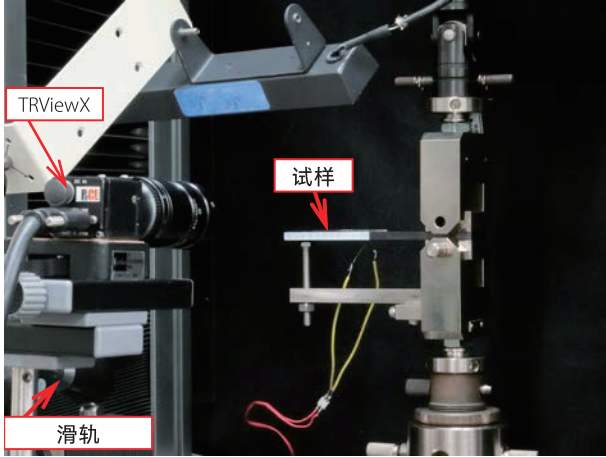


图4 试验示意图

表1 仪器配置和试验条件

试验机	: 精密万能试验机 AGX™ -1 kNV
称重传感器	: 1 kN
测定夹具	: 层间断裂韧性评价夹具
软件	: TRAPEZIUMX™ -V (控制)
裂纹长度观察	: 视频非接触式引伸计 TRViewX 55S + 近摄环
试验速度	: 1 mm/min (裂纹长度 4 mm 以内) → 卸载速度 25 mm/min (试验力 5 N 以内) → 1 mm/min (至断裂)

表2 试样信息

聚酯胶片	: T800S
层压方法	: [0]n
试样厚度	: 5 mm
试样宽度	: 25 mm
试样长度	: 137 mm
初始裂纹长度	: 约 50 mm

■ 试验结果

图5所示为试验结果示例。在本试验的试样中，最初的裂纹扩展是不稳定的，A点的力突然下降。然后，裂纹扩展稳定，在45-50 mm处产生裂纹。

表3所示为试验结果，图6所示为 G_{Ic} 和裂纹长度的关系。初始断裂韧性为0.3-0.4 kJ/m²，但随着裂纹长度增加，断裂韧性增大至0.5-0.6 kJ/m²。这是桥联纤维力等原因导致的。

图7所示为试验结果和TRViewX图像相关联时的各点图像。本次使用的摄像头和镜头的组合最大只有20 mm的视野，但通过使用滑轨，可以观察到裂纹扩展的全部范围。

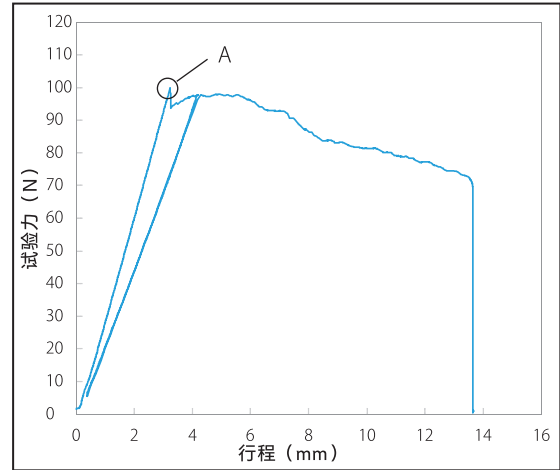


图5 试验结果

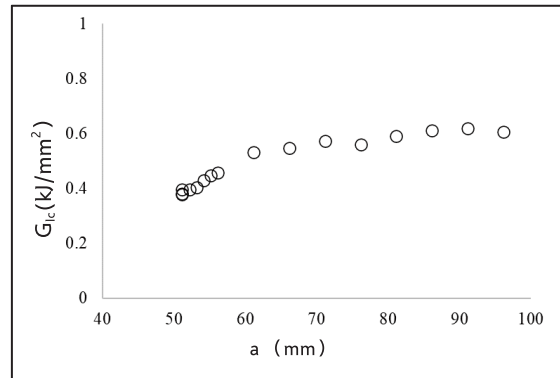


图6 裂纹长度与 G_{Ic} 的关系

表3 试验结果

a (mm)	δ (mm)	P (N)	δ/a	G_{Ic} (kJ/m ²)			
				公式 (1) 无校正	公式 (2) MBT	公式 (3) CC	公式 (4) MCC
51.17 (NL)	3.23	99.6	0.063	0.38	0.32	0.34	0.33
51.17 (VIS)	3.55	95.3	0.069	0.40	0.34	0.35	0.33
51.17 (5%/MAX)	3.25	99.9	0.064	0.38	0.33	0.34	0.33
52.17	3.60	95.9	0.069	0.40	0.34	0.35	0.34
53.17	3.73	96.3	0.070	0.40	0.35	0.36	0.35
54.17	3.99	97.4	0.073	0.43	0.37	0.38	0.37
55.17	4.20	97.8	0.076	0.45	0.39	0.40	0.39
56.17	4.39	97.5	0.078	0.46	0.40	0.41	0.40
61.17	5.55	97.9	0.090	0.53	0.47	0.47	0.47
66.17	6.44	93.7	0.097	0.55	0.48	0.49	0.49
71.17	7.63	89.1	0.107	0.57	0.51	0.51	0.51
76.17	8.50	83.7	0.112	0.56	0.50	0.50	0.50
81.17	9.80	81.5	0.121	0.59	0.53	0.52	0.53
86.17	11.1	79.0	0.129	0.61	0.56	0.54	0.56
91.17	12.4	75.9	0.136	0.62	0.57	0.55	0.57
96.17	13.6	71.4	0.141	0.61	0.55	0.54	0.56

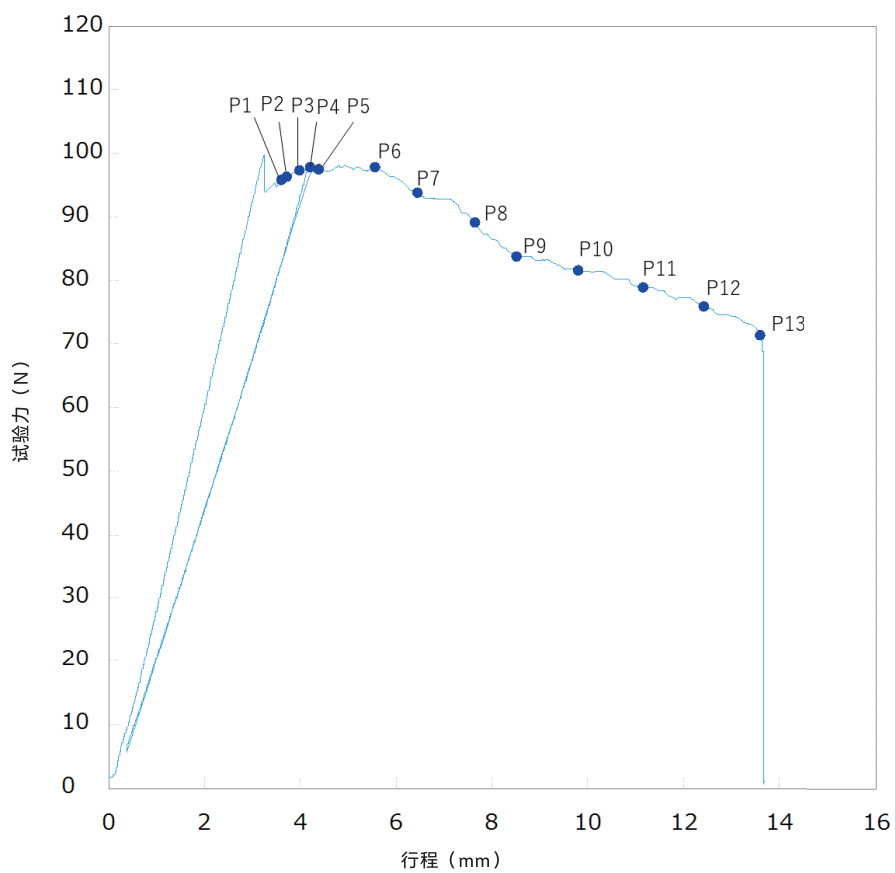
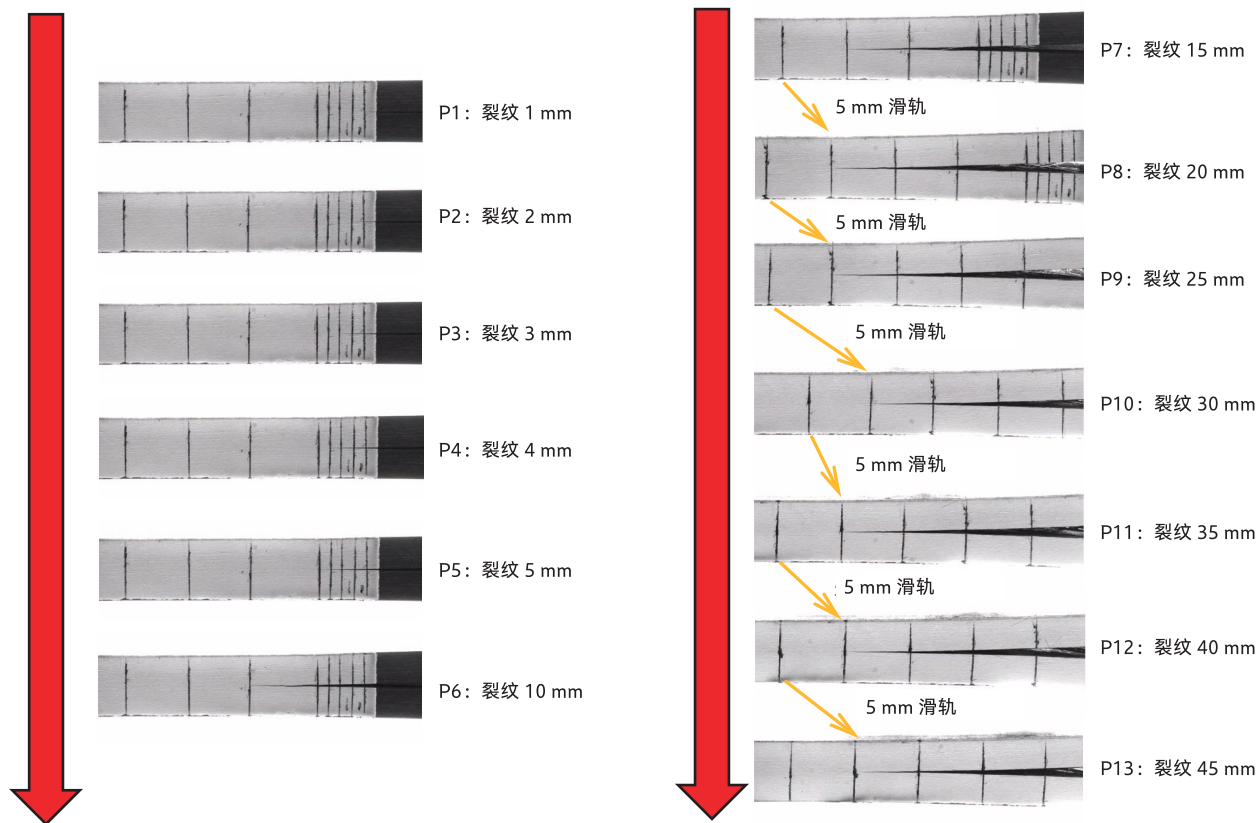


图7 试验结果(下图)和TRViewX图像相关联时的各点图像(上图)

■ 结论

我们进行了依据 ASTM D5528 的试验，获得了模式 I 的层间断裂韧性 G_{Ic} 。ASTM D5528 规定，应求得 50 mm 以内裂纹长度的模式 I 层间断裂韧性 G_{Ic} 的变化，所以本次通过使用裂

纹计和 TRViewX，在试验完成后仍然可以进行分析。此外，通过使用滑轨，TRViewX 也可以观察 50 mm 以内的裂纹情况。

补充 (G_{Ic} 的计算方法)

· 无校正

$$G_{Ic} = \frac{3P\delta}{2ba} \quad \dots \text{公式 (1)}$$

P : 试验力
 δ : 载荷点的位置
 b : 试样宽度
 a : 裂纹长度

· MBT (Modified Beam Theory)

通过无校正的公式在 a 的值中加入 Δ 的校正值的校正方法。

$$G_{Ic} = \frac{3P\delta}{2b(a + |\Delta|)} \quad \dots \text{公式 (2)}$$

其中， Δ 是图8所示的 $C^{1/3}$ - a 线性图的水平轴截距值。
 C 为顺应值和 δ/P 值。

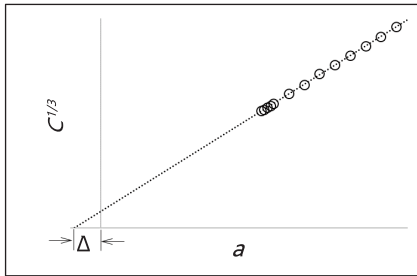


图8 Δ 的计算方法

· CC (Compliance Calibration)

通过无校正的公式，用 n 取代 3 的校正方式。

$$G_{Ic} = \frac{nP\delta}{2ba} \quad \dots \text{公式 (3)}$$

其中， n 是图9所示的 $\log C$ - $\log a$ 线性图的斜率值。

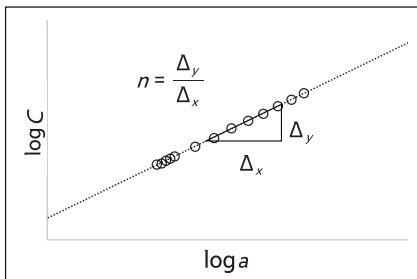


图9 n 的计算方法

· MCC (Modified Compliance Calibration)

使用 A_1 进行校正的校正方法

$$G_{Ic} = \frac{3P^2 C^{2/3}}{2A_1 bh} \quad \dots \text{公式 (4)}$$

h : 试样厚度
 a/h : 按试样厚度归一化的裂纹长度值

其中， A 是图10所示的 a/h - $C^{1/3}$ 的斜率值。

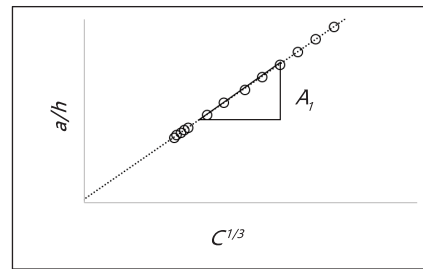


图10 A_1 的计算方法

岛津应用云



AGX、TRAPEZIUMX 是岛津制作所株式会社或其相关公司在日本及其他国家 / 地区的商标。



岛津企业管理（中国）有限公司
 岛津（香港）有限公司

<http://www.shimadzu.com.cn>

用户服务热线电话： 800-810-0439
 400-650-0439

免责声明：

* 本资料未经许可不得擅自修改、转载、销售；
 * 本资料中的所有信息仅供参考，不予任何保证。
 如有变动，恕不另行通知。

第一版发行日：2022 年 01 月